УДК 621.791

Р.Р. КОТЛЫШЕВ

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ СВАРНЫХ НАХЛЁСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, НАГРУЖЕННЫХ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛОЙ

Представлены результаты исследования функции стоимости сварного нахлесточного соединения на экстремум. Получены зависимости, позволяющие проектировать сварные нахлесточные соединения, равнопрочные основному металлу и минимальной стоимости. Представленные расчеты могут быть полезны при проектировании решетчатых конструкций.

Ключевые слова: *оптимизация сварных соединений, прочность нахлесточных соединений, величина катета, длина флангового шва, стоимость.*

Введение. Обеспечение прочности металлоконструкций и их экономичности – важнейшая народнохозяйственная задача, которая в основном достигается применением методов оптимизационного проектирования.

Постановка задачи. Задача проектирования сварного нахлёсточного соединения, рис.1, сводится к назначению размеров швов, обеспечивающих их равнопрочность с основным металлом, и одновременно является задачей на условный экстремум функции стоимости. Условие равнопрочности имеет вид

$$F \cdot |\sigma| = \beta \cdot k \cdot L_{\Sigma} \cdot |\tau'| \,, \qquad (1)$$

где $F = h \cdot \delta$ – площадь поперечного сечения присоединяемого элемента, м^2; $|\sigma|$ - допускаемые напряжения основного металла, Па; β – коэффициент проплавления, зависящий от способа сварки; k - величина катета шва, м; L_{Σ} - суммарная длина ($L_{\Sigma} = l_{фл1} + l_{фл2} + h$) фланговых $l_{фл1}$, $l_{фл2}$ и торцового h швов, м; $|\tau'|$ - допускаемые напряжения сварного соединения, которые назначаются в долях от допускаемых напряжений основного металла, Па,

$$|\tau'| = \alpha \cdot |\sigma| \,, \qquad (2)$$

где α = 0,6-0,65.

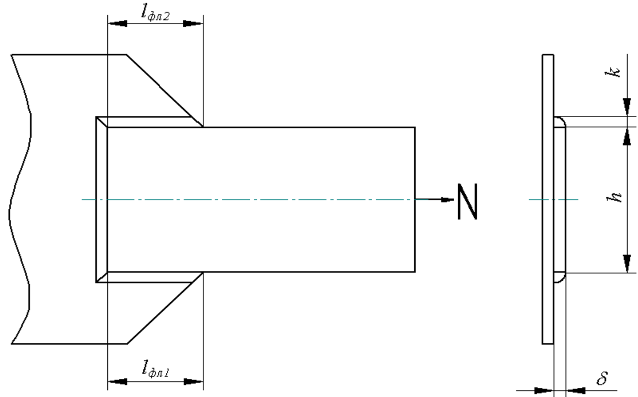


Рис.1. Нахлесточное соединение пластины с косынкой

Объем наплавленного металла, м^3,

$$V = \frac{k^2 \cdot L_\Sigma}{2} . \qquad (3)$$

Объем основного металла, заключенного в нахлестке, м^3,

$$V_{ОМ} = F \cdot l_{фл1} . \qquad (4)$$

Стоимость соединения C складывается из стоимости наплавленного и основного металла, ограниченного сварными швами, руб.:

$$C = \frac{k^2 \cdot L_\Sigma \cdot \gamma \cdot C_{НМ}}{2} + F \cdot l_{фл1} \cdot \gamma \cdot C_{ОМ} , \qquad (5)$$

где $C_{НМ}$ - стоимость наплавленного металла, руб.; $C_{ОМ}$ - стоимость основного металла, руб.; γ – плотность металла, кг/м^3.

Из (1) следует, что прочность сварного соединения зависит от длины шва и величины катета. Увеличение одного параметра приводит к пропорциональному уменьшению другого. Однако уменьшение катета шва приводит к уменьшению объема и стоимости наплавленного металла (5). При этом увеличение длины флангового шва приводит к увеличению доли стоимости основного металла, ограниченного сварными швами (5).

Были проанализированы два типа нахлёсточных соединений.

На рис. 1 показано нахлёсточное соединение пластины с косынкой, которое получено путём выполнения комбинированных швов ($l_{фл1}$, $l_{фл2}$, h). Из уравнения (1) требуемый катет шва, обеспечивающий равнопрочность соединения, рассчитывается по формуле

$$k = \frac{\delta \cdot h}{\alpha \cdot \beta \cdot \left(2 \cdot l_{фл1} + h\right)} . \qquad (6)$$

Подставив значение катета из уравнения (6) в уравнение (5), получим:

$$C = \frac{\delta^2 \cdot h^2}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2} \cdot \frac{1}{\left(2 \cdot l_{фл1} + h\right)} \cdot \gamma \cdot C_{НМ} + \delta \cdot h \cdot l_{фл1} \cdot \gamma \cdot C_{ОМ} . \qquad (7)$$

Для нахождения экстремума необходимо первую производную (7) относительно длины флангового шва приравнять нулю:

$$\frac{\delta^2 \cdot h^2}{2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2} \cdot C_{НМ} \cdot \gamma \cdot (-2) \frac{1}{\left(2 \cdot l_{фл1} + h\right)^2} + \delta \cdot h \cdot \gamma \cdot C_{ОМ} = 0 ; \qquad (8)$$

$$\frac{\delta \cdot h \cdot C_{НМ}}{\alpha^2 \cdot \beta^2 \cdot \left(2 \cdot l_{фл1} + h\right)^2} = C_{ОМ} . \qquad (9)$$

По данным ИЭС им. Е.О. Патона, стоимость наплавленного металла в 10-40 раз больше стоимости основного металла: $\psi = C_{НМ} / C_{ОМ}$. Подставим значение ψ в формулу (9):

$$4 \cdot l_{фл1}^2 + 4 \cdot h \cdot l_{фл1} + \left(h^2 - \frac{\delta \cdot h \cdot \psi}{\alpha^2 \cdot \beta^2} \right) = 0 . \qquad (10)$$

Решив квадратное уравнение, получим оптимальную длину шва

$$l_{фл.опт.} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\delta \cdot h \cdot \psi}{\alpha^2 \cdot \beta^2}} - h\right). \qquad (11)$$

Эту формулу можно записать в следующем виде:

$$l_{фл.опт} = \frac{1}{2}\left(\frac{\sqrt{F \cdot \psi}}{\alpha \cdot \beta} - h\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\sqrt{N \cdot \psi}}{\alpha \cdot \beta \cdot \sqrt{|\sigma|}} - h\right), \qquad (12)$$

где N - усилие, приложенное к соединению, Н.

Подставляя оптимальную длину флангового шва $l_{фл.опт}$ в формулу (6), вычисляем оптимальную величину катета шва.

Если присоединяемая пластина работает на сжатие, то формула для расчёта оптимальной длины шва будет иметь следующий вид:

$$l^{сж}_{фл.опт} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\delta \cdot h \cdot \psi \cdot \varphi}{\alpha^2 \cdot \beta^2}} - h\right), \qquad (13)$$

где φ - коэффициент продольного изгиба, зависящий от длины элемента и его радиуса инерции.

Оптимальная величина катета шва при сжатии

$$k^{сж} = \frac{\delta \cdot h \cdot \varphi}{\alpha \cdot \beta \cdot \left(2 \cdot l^{сж}_{фл.опт.} + h\right)}. \qquad (14)$$

Рассмотрим более сложный случай присоединения уголков к косынке (рис.2).

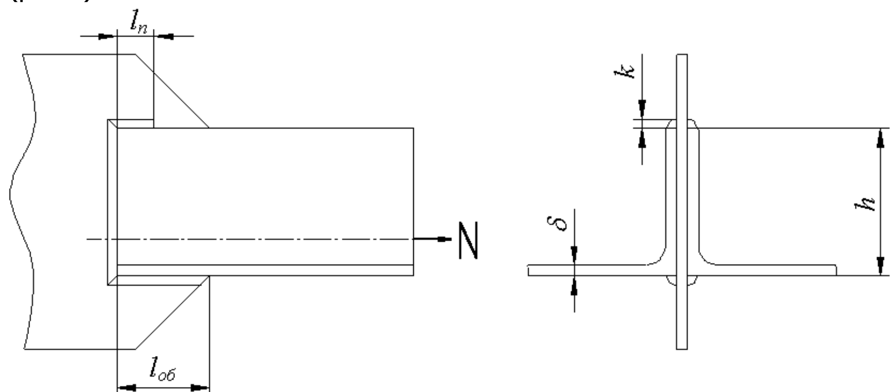


Рис.2. Нахлесточное соединение равнобоких уголков с косынкой

Особенностью расчёта такого соединения является то, что через фланговые швы, прикрепляющие уголок к косынке, передаются разные усилия. Через сварной шов, прикрепляющий обушок уголка к косынке, передается 70% усилия, а через шов, присоединяющий перо уголка к косынке, - оставшиеся 30% усилия [1]. В связи с этим ниже приводятся расчёты, аналогичные предыдущим, без подробных комментариев.

Длина сварного шва по обушку $l_{об} = 0{,}7(L_\Sigma - h)$, м, тогда длина шва по перу $l_п = 0{,}3(L_\Sigma - h) = 3/7\ l_{об}$, м.

Условие равнопрочности сварного соединения и основного металла в данном случае имеет вид:

$$\beta \cdot k \cdot 2 \cdot \left(\frac{10 \cdot l_{об.}}{7} + h \right) \cdot \left| \tau' \right| = 2 \cdot \delta \cdot \left(h + h - \delta \right) \cdot \left| \sigma \right|; \qquad (15)$$

$$k = \frac{\delta \cdot \left(2 \cdot h - \delta \right)}{\alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{10 \cdot l_{об.опт.}}{7} + h \right)}. \qquad (16)$$

Стоимость соединения

$$C = \frac{k^2}{2} \cdot 2 \cdot \left(\frac{10 \cdot l_{об.}}{7} + h \right) \cdot \gamma \cdot C_{НМ} + \delta \cdot \left(2h - \delta \right) \cdot 2 \cdot l_{об.} \cdot \gamma \cdot C_{ОМ}. \qquad (17)$$

Подставив значение катета (16) в формулу (17), получим

$$C = \frac{\delta^2 \left(2h - \delta \right)^2}{2\alpha^2 \cdot \beta^2 \cdot \left(\frac{10 \cdot l_{об.}}{7} + h \right)} \cdot \gamma \cdot C_{НМ} + \delta \cdot \left(2h - \delta \right) \cdot 2 \cdot l_{об.} \cdot \gamma \cdot C_{ОМ}. \qquad (18)$$

Первая производная (18)

$$C' = - \frac{10 \cdot \delta^2 \left(2h - \delta \right)^2}{7 \cdot 2 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2 \cdot \left(\frac{10 \cdot l_{об.}}{7} + h \right)^2} \cdot \gamma \cdot \psi \cdot C_{ОМ} + 2 \cdot \delta \left(2h - \delta \right) \cdot \gamma \cdot C_{ОМ} = 0. \qquad (19)$$

После решения уравнения и преобразований получим

$$l_{об.опт.} = \frac{\sqrt{35 \cdot \delta \cdot \left(2 \cdot h - \delta \right) \cdot \psi}}{10 \cdot \alpha \cdot \beta} - \frac{7 \cdot h}{10}. \qquad (20)$$

Катет находим по формуле (16).

Если присоединяемый уголок работает на сжатие, то формула для расчёта полной длины шва будет иметь следующий вид:

$$l^{сж}_{об.опт.} = \frac{\sqrt{35 \cdot \delta \cdot \left(2 \cdot h - \delta \right) \cdot \psi \cdot \varphi}}{10 \cdot \alpha \cdot \beta} - \frac{7 \cdot h}{10}. \qquad (21)$$

Тогда значение катета шва рассчитывается по формуле

$$k^{сж} = \frac{\delta \cdot \left(2 \cdot h - \delta \right) \cdot \varphi}{\alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{10 \cdot l^{сж}_{фл.опт.}}{7} + h \right)}. \qquad (22)$$

Результаты исследований. Проведенные расчеты пластин и уголков разных размеров показывают, что в ряде случаев расчетное значение катета превышает толщину присоединяемого элемента. Поэтому необходимо выявить критерий, при котором возможно использование данной методики расчета сварных швов.

Рассмотрим соединение пластины с косынкой (см. рис.1). Найдем критерий, при котором катет не будет превышать толщину пластины, т.е. $k = \delta$. Подставив значение катета в формулу (6), получим

$$\delta = \frac{\delta \cdot h}{\alpha \cdot \beta \cdot (2l_1 + h)}.$$

Подставим в данную формулу значение оптимальной длины флангового шва из формулы (11), получим

$$\frac{\delta \cdot h}{\alpha \cdot \beta \cdot \left[2\left(\frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\delta \cdot h \cdot \psi}{\alpha^2 \cdot \beta^2}} - h\right)\right) + h\right]} = \delta .$$

В результате преобразований получим требуемый критерий

$$\frac{h}{\delta \cdot \psi} = 1. \qquad (23)$$

Если $\frac{h}{\delta} = \psi$ – расчетный катет шва будет равен толщине пластины.

Если соотношение $\frac{h}{\delta} > \psi$ – катет необходимо назначать равным толщине присоединяемой пластины. После чего вычислить длину флангового шва по формуле (6).

Если $\frac{h}{\delta} < \psi$ – необходимо воспользоваться формулой (11), а затем вычислить катеты по формуле (6).

Для сжатых пластин критерий с учетом продольного изгиба примет вид

$$\varphi \cdot \frac{h}{\delta} = \psi . \qquad (24)$$

Обычно швы, прикрепляющие уголки к плоскости, приваривают катетами одинаковой величины, равной 0,8δ [1,2]. Подставив значение катета k=0,8δ и оптимальной длины шва по обушку (20) в формулу (16), получим

$$\psi = 1{,}75\frac{(2h - \delta)}{\delta}. \qquad (25)$$

Если $\psi = 1{,}75\frac{(2h - \delta)}{\delta}$ – расчетный катет шва будет равен 0,8δ.

Если соотношение $1{,}75\frac{(2h - \delta)}{\delta} > \psi$ – катет необходимо назначать равным 0,8δ. После чего вычислить длину флангового шва по форму-

ле (20).

Если $1{,}75\frac{(2h-\delta)}{\delta}<\psi$ – необходимо воспользоваться формулой (20), а затем вычислить катет по формуле (16).

Для сжатых уголков с учетом продольного изгиба

$$\psi = 1{,}75\cdot\varphi\cdot\frac{(2h-\delta)}{\delta}. \qquad (26)$$

Пример расчета сварных швов, прикрепляющих пластину к плоскости. Предположим, что необходимо прикрепить пластину толщиной 10 мм и шириной 200 мм к косынке, которая будет работать на растяжение. При этом известно, что при выбранной технологии (способе сварки) и сварочных материалах соотношение стоимости наплавленного металла к основному составит 30. Шов выполняется ручной дуговой сваркой.

Тогда имеем $\frac{h}{\delta}=\frac{200}{10}=20$, т.е. выполняется условие (23). Далее по формуле (11) определяем оптимальную длину флангового шва

$$l_{фл.опт}=\frac{1}{2}\left(\frac{\sqrt{10\cdot200\cdot30}}{0{,}6\cdot0{,}7}-200\right)=192\text{ (мм)};$$

$$k_{опт}=\frac{10\cdot200}{0{,}6\cdot0{,}7\cdot(2\cdot192+200)}=8\text{ (мм), что не превышает δ=10 мм.}$$

На рис.3 представлены зависимости стоимости основного и наплавленного металла, а также стоимость сварного нахлесточного соединения от величины катета сварного шва. Функция стоимости сварного соединения (сплошная линия на рисунке) имеет минимум, который точно совпадает с рассчитанным по предложенным зависимостям.

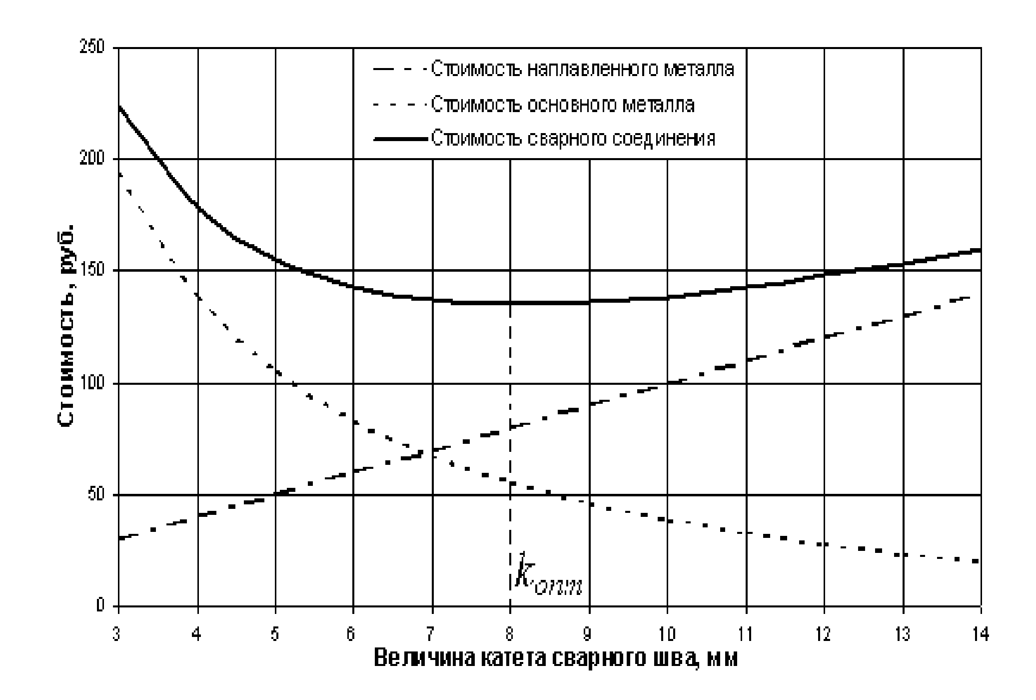


Рис.3. Зависимость стоимости сварных нахлесточных соединений от величины катета шва

Выводы. Предложены методика расчета и критерии оценки путей оптимизации для двух видов сварных нахлесточных соединений: для пластины – h/δ , а для уголков – $1{,}75(2h-\delta)/\delta$.

Если величина критерия больше либо равна отношению стоимости наплавленного металла к основному (ψ), то катет необходимо назначать максимальным, исходя из конструктивных соображений (для пластины катет равен толщине металла пластины, для уголков - 0,8δ).

Если величина критерия меньше отношения стоимости наплавленного металла к основному (ψ), то для расчета сварных швов следует использовать предложенную методику.

Библиографический список

1. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие.- М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.

2. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация производства и проектирование сварных конструкций: Учеб. пособие.- М.: Высшая школа, 1983. – 344 с.

Материал поступил в редакцию 24.11.06.

R.R. KOTLYSHEV

OPTIMIZATION OF WELDED LAP JOINTS, LOADED LONGITUDINAL FORCE ON PROFITABILITY

The results of researching function of cost of welded lap joints are presented. Two lap joints are examined, working both on a tension, and on a squeezing: plate with a plane and corners with a plane. The dependences are deduced for designing welded lap joints with minimal cost.
The results of researches can be useful to the designers.

КОТЛЫШЕВ Роман Рефатович (р. 1983), сотрудник кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства». Окончил ДГТУ по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» (2005); магистратура по направлению «Технологические машины и оборудование», ДГТУ, 2006.
Область исследований и интересов: прочность сварных конструкций.
Опубликовано 2 статьи.